Перепишем уравнения (12) и (14) в виде

$$\frac{V_{2t}}{V_2}=\left(\frac{P_2}{\overline{P}_0}\right)^{N_1} \text{ и } \frac{V_{1t}}{V_1}=\left(\frac{P_1}{\overline{P}_0}\right)^{N_2}. \qquad (15)$$

Тогда для определения V_{1t}/V_{2t} по величине V_1/V_2 получим формулу

$$\frac{V_{1t}}{V_{2t}}=\frac{V_1}{V_2}\left(\frac{P_1}{\overline{P}_0}\right)^{N_2}\left(\frac{P_2}{\overline{P}_0}\right)^{-N_1}. \qquad (16)$$

Итогом изложенного является рекомендация уравнений (4) и (5) для расчета проточной части паровой турбины с конца. По известной геометрии ступеней и параметрам V_2 и P_2 за последней ступенью при помощи уравнений (4) и (5), а также системы уравнений и алгоритма расчета, изложенных в работе [2], можно определить 11 термодинамических параметров для каждой ступени.

Список литературы: **1.** *Котляр И.В.* Переменный режим работы газотурбинных установок. – М., 1961. – 287 с. **2.** *Капинос В.М., Навроцкий В.В., Смородская И.В.* Приближенный поступенчатый расчет проточной части турбины по конечным параметрам // Вестник НТУ «ХПИ». – 2002. – № 19. – С. 100-106. **3.** *Капинос В.М. Гаркуша А.В.* Переменный режим работы паровых турбин. – Харьков, 1989. – 174 с. **4.** *Щегляев А.В.* Паровые турбины. – М., 1976. – 357 с. **5.** *Щегляев А.В.* Паровые турбины. – М., 1955. – 320 с. **5.** *Трояновский Б.М., Самойлович Г.С.* Паровые и газовые турбины. Сборник задач. – М., 1978. – 236 с. **6.** *Семенов А.С., Шевченко А.М.* Тепловой расчет паровой турбины. – Киев, 1975. – 206с. **7.** *Дейч М.Е.* Техническая газодинамика. – М., 1974. – 592 с. **8.** *Жуковский В.С.* Техническая термодинамика. – М., 1952. – 439 с. **9.** *Траупель В.* Тепловые турбомашины. – М., 1961. – Т.1, 344 с.

Поступила в редколлегию 15.05.04

УДК 621.91

В.М.КАПИНОС, докт.техн.наук; ***В.Н.ПУСТОВАЛОВ***, канд.техн.наук; ***М.В. МЕЗЕРНАЯ***; НТУ «ХПИ»

ВЛИЯНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НА ТЕРМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

У розрахунках нестаціонарних процесів теплообміну співвідношення, що описують конвективний теплообмін, використовуються в такому ж виді, як і при стаціонарних умовах, що не завжди може бути виправданим. У цьому зв'язку розглянуте наближене рішення нестаціонарної задачі теплопровідності для необмеженої пластини з введенням заміни теплового опору граничними умовами третього роду. Показано, що умовний коефіцієнт тепловіддачі на поверхні, що ізолюється, у вигляді відношення теплопровідності до товщини ізоляції, що використовується при стаціонарному режимі, внаслідок акумуляції теплоти збільшується в нестаціонарних умовах, що необхідно приймати до уваги.

For the transient conduction predictions the relations which describe convective heat exchange are used in the same form as for the steady-state conduction, which could not be always justified. In this connection the approximate solution of the transient conduction problem for an unlimited plate was considered with the replacement of its thermal resistance by the boundary conditions of the third kind. It is shown that the conventional heat transfer coefficient on the insulated plate in the form of the ratio of

the heat conduction to the plate thickness, which is used for the steady-state mode, owing to accumulation of heat is increased in the transient conditions, which is necessary to take into account.

В инженерно-технических расчетах стационарных задач теплопроводности часто прибегают к их стилизации путем замены тепловой изоляции граничными условиями $3^{го}$ рода. Обычно условный коэффициент теплоотдачи на изолируемой поверхности определяют по формуле

$$\alpha = \lambda/\delta,$$

где λ, δ – коэффициент теплопроводности и толщина изоляции.

Тепловой поток находят по температурному перепаду в слое изоляции.

Однако такой прием упрощения задачи при нестационарных условиях теплообмена в уточнении нуждается.

Поскольку коэффициент температуропроводности изоляции примерно на порядок меньше коэффициента температуропроводности стали, то прогрев слоя изоляции происходит медленнее, вследствие чего распределение по толщине изоляции длительное время будет отличаться от линейного.

Чтобы оценить влияние нестационарности процесса теплопроводности на величину условного коэффициента теплоотдачи, воспользуемся приближенным методом решения задачи теплопроводности с заданием параболического профиля температуры.

Рассмотрим нестационарный теплообмен теплоизолированной неограниченной пластины (плиты).

Пусть начальная температура слоя изоляции равна t_0. При $y = 0$ температура плиты в течение всего процесса теплообмена поддерживается постоянной, равной t_n (температура поверхности).

Примем, следуя [1], параболическое распределение температуры в прогретом слое $Y = Y(\tau)$, где τ – время.

$$t = t_0 + (t_n - t_0)\left((Y - y)/Y\right)^n. \tag{1}$$

Уравнение (1) удовлетворяет граничным условиям (рис. 1)

$$y = 0; \quad t = t_n; \quad y = Y; \quad t = t_0.$$

Проинтегрируем уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = \frac{1}{a}\frac{\partial t}{\partial \tau} \tag{2}$$

в пределах от $y = 0$ до $y = Y$. При интегрировании используем правило Лейбница о дифференцировании под знаком интеграла с переменным пределом интегрирования, имея в виду, что $Y = Y(\tau)$.

Будем иметь

$$\left.\frac{\partial t}{\partial y}\right|_Y - \left.\frac{\partial t}{\partial y}\right|_0 = \frac{1}{a}\int_0^Y \frac{\partial t}{\partial \tau} dy$$

или

$$\left.\frac{\partial t}{\partial y}\right|_Y - \left.\frac{\partial t}{\partial y}\right|_0 = \frac{1}{a}\left(\frac{d}{d\tau}\int_0^Y t\, dy - t|_Y \frac{dY}{d\tau}\right). \tag{3}$$

Используя (1) и замечая, что $\left.\frac{\partial t}{\partial y}\right|_Y = 0$, левую части уравнения (3) представим в виде

$$-\left.\frac{\partial t}{\partial y}\right|_0 = -n(t_n - t_0)\left(\frac{Y-y}{Y}\right)^{n-1}\left(-\frac{1}{Y}\right) = \frac{n(t_n - t_0)}{Y}. \qquad (4)$$

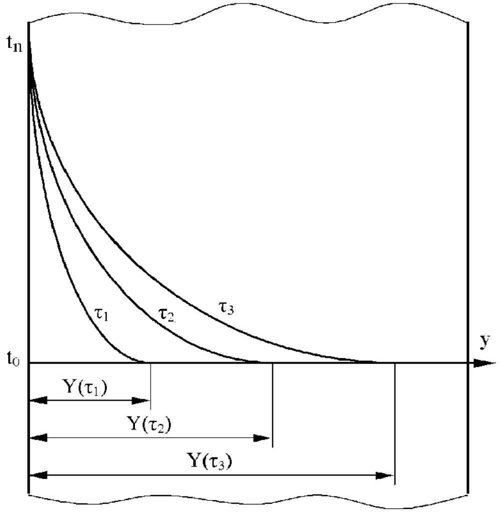

Рисунок 1 – Распределение температуры в слое прогреваемой изоляции в разные моменты времени

Тогда уравнение (3) можно переписать следующим образом

$$\frac{n(t_n - t_0)}{Y} = \frac{1}{a}\left[\frac{\partial t}{\partial \tau}\left(t_0 Y + \frac{(t_n - t_0)}{n+1} Y\right) - t_0 \frac{dY}{d\tau}\right],$$

или после упрощений

$$a\,d\tau = \frac{1}{n(n+1)} YdY.$$

Интегрирование этого уравнения дает

$$a\tau = \frac{Y^2}{2n(n+1)}. \qquad (5)$$

Сравнительные расчеты, приведенные в [1], показывают, что при $n = 2$ приближенные решения задач нестационарной теплопроводности достаточно хорошо совпадают с возможными точными решениями [2]. Приближенные решения оказываются значительно более простыми и более наглядными.

При $n = 2$ из уравнения (5) следует, что толщина прогретого слоя изоляции за время τ составляет

$$Y = \sqrt{a\tau 2п(п+1)} = \sqrt{12a\tau}\,. \tag{6}$$

Найденное решение справедливо при $Y \le \delta$

В предельном случае $Y = \delta$ находим, что число Фурье

$$(\mathrm{Fo})_{\max} = \frac{a\tau}{\delta^2} \approx 0{,}1\,. \tag{7}$$

Чтобы получить выражение для условного коэффициента теплоотдачи (или значения термического (теплового) сопротивления – в нестационарном теплообмене это понятие связано с коэффициентом температуропроводности) [3], воспользуемся следующими уравнениями теплового баланса.

Тепловой поток в сечении $y = 0$ через произвольную поверхность F

$$Q = -\lambda \left.\frac{dt}{dy}\right|_{y=0} F\,. \tag{8}$$

Используя (4), находим, что

$$Q = \lambda \frac{t_n - t_0}{Y} nF\,. \tag{9}$$

Формально можно записать также

$$Q = \alpha(t_n - 1_0)F\,. \tag{10}$$

Приравнивая эти выражения, получим

$$\alpha = \frac{\lambda n}{Y} = \frac{\lambda n}{\sqrt{2n(n+1)a\tau}}$$

или, при $n = 2$

$$\alpha = \frac{2\lambda}{\sqrt{12a\tau}} \approx \frac{\lambda}{\delta}\frac{0{,}6}{\sqrt{\mathrm{Fo}}}\,.$$

Когда прогретый слой становится равным толщине слоя и $F_0 \approx 0{,}1$

$$\alpha \approx 2\lambda/\delta, \tag{11}$$

т.е. условный коэффициент теплоотдачи при $F_0 \approx 0{,}1$ остается еще в 2 раза больше, чем при стационарном режиме. При меньших значениях числа Fo различие будет еще более значительным.

Приведенный расчет показывает, что аккумуляция теплоты изоляцией в нестационарном процессе теплообмена может заметно сказаться на величине условного коэффициента теплоотдачи, а, следовательно, и на температурном поле теплоизолируемого тела. Значение условного коэффициента теплоотдачи в виде $\alpha = \lambda/\delta$ не может использоваться при нестационарных условиях теплообмена.

Список литературы: 1. *Вейник А.И.* Приближенный расчет процессов теплопроводности. – М.: ГЭИ, 1959. – 184 с. **2.** *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с. **3.** *Ландау Л.Д., Ахиезер А. И. Лифшиц Е.М.* Курс общей физики. – М.: Наука, 1969. – 399 с.

Поступила в редколлегию 10.03.04